

PROGRAMA DE MEJORA DE LA CALIDAD - PLAN ESTRATÉGICO GENERAL 2013-2018  
Planes de formación e innovación  
MEMORIA  
Proyecto de innovación y mejora docente  
2016/2017



Fomento del pensamiento crítico en el ámbito de la ingeniería del terreno: contraste entre realidad y teoría con la ayuda de métodos de auscultación electrónicos. CLAVE: ID2016/168

---

Coordinador

J. Nespereira Jato

Equipo

S. Monterrubio Pérez  
J.A. Alonso Llamas  
B. García Vasallo

B. Fernández Macarro  
J. de la Concepción Viñas  
M<sup>a</sup> J. Martín Martínez

---

## Contenido

1. INTRODUCCIÓN .....	3
2. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL MODELO .....	5
2.1. Criterios de diseño .....	5
2.2. Pruebas piloto .....	5
2.3. Construcción de la urna .....	8
2.4. Implementación de la auscultación .....	10
Algunos aspectos sobre el Arduino .....	10
Control de fuerza a través de Force Sensitive Resistor (FSR) .....	11
Implementación de los sensores en los modelos .....	12
2.5. El llenado del modelo .....	14
3. EL WORKSHOP .....	16
3.1. Introducción.....	16
3.2. Evaluación inicial.....	17
3.3. Conceptos teóricos.....	18
3.4. Trabajo sobre el modelo de un muro de contención: los empujes activos del terreno sobre un muro de gravedad. ....	19
Introducción .....	19
Presentación del modelo.....	19
Otras posibles variaciones sobre el Caso 1ª. ....	20
Resolución de referencia .....	20
3.5. Trabajo sobre el modelo de una pantalla: los empujes activos y pasivos. ....	23
Introducción al caso planteado .....	23
Enunciado para los alumnos .....	24
Otras posibles variaciones .....	24
Resolución de referencia .....	24
3.6. Evaluación intermedia (formativa) .....	26
3.7. Evaluación final .....	27
4. JUSTIFICACIÓN ECONÓMICA .....	28
4.1. Presupuesto .....	28
4.2. Gastos.....	28
4.3. Balance final .....	29
5. CONCLUSIONES FINALES.....	30

# 1. INTRODUCCIÓN

---

## *Preámbulo*

En el ámbito de la ingeniería, en no pocas situaciones se trabaja con formulaciones que, simplificando el problema o asumiendo una o varias hipótesis, permiten realizar cálculos en relación con la viabilidad de un diseño, tanto desde el punto de vista de la seguridad como del económico.

La mayoría de las veces los planteamientos matemáticos resultan simples y, por ello, los alumnos recurren generalmente a la sencilla memorización de una fórmula. Para nosotros como profesores, esta situación tiene un grave inconveniente y es que, aunque permite a los estudiantes resolver con facilidad problemas que podemos denominar “convencionales”, los aparta de lo que debiera ser su - y nuestro- verdadero objetivo: comprender el porqué de la formulación y conocer el grado de exactitud que se desprende de su resolución.

Por otro lado, un ingeniero civil a lo largo de su trayectoria profesional se enfrenta al diseño de grandes estructuras de contención, para las que debe conocer o proponer dimensiones, fuerzas actuantes, posibles heterogeneidades, ... Pero, además de diseñarlas, debe velar por el cumplimiento de los criterios de seguridad y, por ende, de la verificación del comportamiento previsto en proyecto a lo largo de toda su vida útil. Por lo tanto, la confrontación entre el diseño, *en papel*, y la realidad ha de trabajarse ya desde las etapas de formación de un ingeniero.

Este proyecto de innovación docente crea un modelo físico en el que representar a escala situaciones de obras en las que intervienen de manera dominantes los empujes del terreno, añadiendo además la posibilidad de medir las fuerzas reales que realmente actúan. Y precisamente esta instrumentación o auscultación es la que debe permitir el contraste entre los cálculos de diseño y la realidad manifestada por el comportamiento real.

El trabajo que esta memoria desarrolla se enmarca en el Programa de Mejora de la Calidad-Plan Estratégico 2013-2018, convocatoria del Vicerrectorado de Docencia de la Universidad de Salamanca, año 2016. Dentro de los distintos tipos de proyectos contemplados, éste pertenece a la Modalidad 1, dedicada a la innovación en metodologías docentes para clases teóricas y prácticas.

Este proyecto pone las bases para una metodología de enseñanza alejada de un enfoque a través de problemas de solución única y exacta, abriendo una ventana a procedimientos que critican las teorías que sustentan los cálculos habitualmente empleados en este tipo de estructuras. Además, la introducción de la electrónica enfrenta al alumno a una situación en la que deberá recurrir a contenidos transversales, adquiridos en asignaturas básicas del grado, y que, frecuentemente, son consideradas por los estudiantes como “poco útiles y ajenas” al desarrollo de su profesión. Este proyecto les demostrará cuán equivocada es esa idea.

Finalmente, este trabajo propone un proceso de evaluación del método de aprendizaje articulado a través de cuestionarios y actividades. Éstas sirven para fijar los conocimientos de partida, subrayar los aspectos más relevantes de los contenidos tratados y, finalmente, manifestar lo aprendido. Todo ello se engloba dentro de un Workshop que se expone ampliamente en el capítulo tercero de esta memoria.

### ***Objetivos del proyecto***

El objetivo planteado para este trabajo es plasmar en un documento un Workshop diseñado para que, en unas tres horas de trabajo supervisado, los alumnos se enfrenten al problema “Los empujes del terreno: contraste entre el comportamiento teórico y el experimental con la ayuda de sistemas electrónicos”.

Como condicionantes u objetivos particulares, el Workshop debe fomentar que el alumno contraste la bondad de los planteamientos teóricos con una situación real representada por un modelo físico a escala. Y para ello, se exploran en este proyecto las posibilidades que el uso de la electrónica ofrece para medir fuerzas mediante el empleo de diferentes sensores analógicos.

Finalmente, se planteó como objetivo adicional el diseño de sistemas de evaluación formativos, que además ha de servir para que el alumno abandone la idea de la existencia de cálculos geotécnicos “inamovibles, únicos”. Asumir este hecho se considera que resultará motivante para afrontar otras temáticas con una mentalidad más abierta y crítica, lo que de algún modo fomentará la búsqueda de distintas soluciones para un mismo problema geotécnico.

### ***Presupuesto***

Este proyecto ha sido financiado con 320 € por la Universidad de Salamanca, a través de su Programa de Mejora de la Calidad-Plan Estratégico 2013-2018.

## 2. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL MODELO

Todo este proyecto pivota sobre un modelo analógico que ha sido diseñado y construido expresamente para este trabajo. En este capítulo se explica con detalle el proceso seguido para su construcción, desde el establecimiento de los criterios guía de diseño, pasando por las pruebas piloto, la construcción del primer prototipo y la validación del mismo. En este desarrollo se presenta también la implementación del sistema de control electrónico.

### 2.1. Criterios de diseño

El punto de partida para el diseño fue la necesidad de contar con una urna para que los alumnos puedan ver, simular y resolver problemas relacionados con los empujes del terreno. Para su diseño, se establecieron tres ideas básicas (Figura 1):

- escala del modelo lo suficientemente grande como para que los equipos de medida sean efectivos<sup>1</sup>, pero a la vez,
- suficientemente pequeña como para poder considerarlo material didáctico móvil; y finalmente,
- ha de permitir la observación de los procesos o comportamientos del terreno, lo cual aporta la principal diferencia didáctica frente a otros métodos docentes.

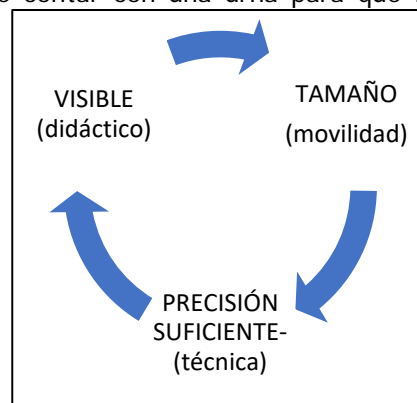


Figura 1. Diagrama de criterios de diseño.

Los problemas básicos a recrear deben simular por un lado los empujes de tierras ante un muro de hormigón y, por otro, las estructuras tipo pantalla en las que el terreno no actúa tan sólo como elemento desestabilizador, sino que también lo hace aportando resistencia a través del empuje pasivo que se desarrolla.

### 2.2. Pruebas piloto

El proyecto comenzó con una fase de experimentación encaminada a definir la estructura a construir para alojar el modelo y a probar los sensores de fuerza que permitiesen contrastar las solicitaciones sobre las estructuras de contención.

Es necesario señalar en este punto que la comprobación de la bondad de las medidas de los sensores ha sido una tarea difícil y que ha dado importantes quebraderos de cabeza al equipo de trabajo. De este modo, inicialmente para testear los sensores se pensó un sencillo procedimiento consistente en colocar un objeto de masa conocida sobre el sensor, y este último conectado a una placa de ARDUINO controlada a su vez desde un ordenador portátil (Posteriormente se trabajó con una urna cúbica (300 x 300 x 300 mm) de metacrilato de 10 mm de espesor, arroz, serrín y arena media como materiales de relleno, y sensores de fuerza FSR (*force sensitive record*). (Figura 3) adheridos al interior de la urna con cinta adhesiva; se relleno la urna en etapas sucesivas anotando en todas ellas las lecturas del sensor (resistividad y fuerza). Al mismo tiempo y, por otro lado, las medidas de fuerza se contrastaron con la fuerza teórica que debería reflejar el equipo, considerando ésta como el peso de una masa de material colocado, que a su vez se obtiene a partir de la densidad del

<sup>1</sup> Precisión: los sensores deben permitir captar y medir fuerzas pequeñas (de 0,2 N en adelante)

material colocado y de su volumen, según la ecuación:

Figura 2). Las incoherencias iniciales obtenidas fueron las que obligaron a introducir y trabajar más a fondo en el proceso de calibración. Si bien es cierto que el fabricante aporta la suya propia, es conveniente contrastarla para tener mayor confianza en las medidas y comprender mejor el mecanismo de medida en el que se fundamenta.

Posteriormente se trabajó con una urna cúbica (300 x 300 x 300 mm) de metacrilato de 10 mm de espesor, arroz, serrín y arena media como materiales de relleno, y sensores de fuerza FSR (*force sensitive record*). (Figura 3) adheridos al interior de la urna con cinta adhesiva; se relleno la urna en etapas sucesivas anotando en todas ellas las lecturas del sensor (resistividad y fuerza). Al mismo tiempo y, por otro lado, las medidas de fuerza se contrastaron con la fuerza teórica que debería reflejar el equipo, considerando ésta como el peso de una masa de material colocado, que a su vez se obtiene a partir de la densidad del material colocado y de su volumen, según la ecuación:

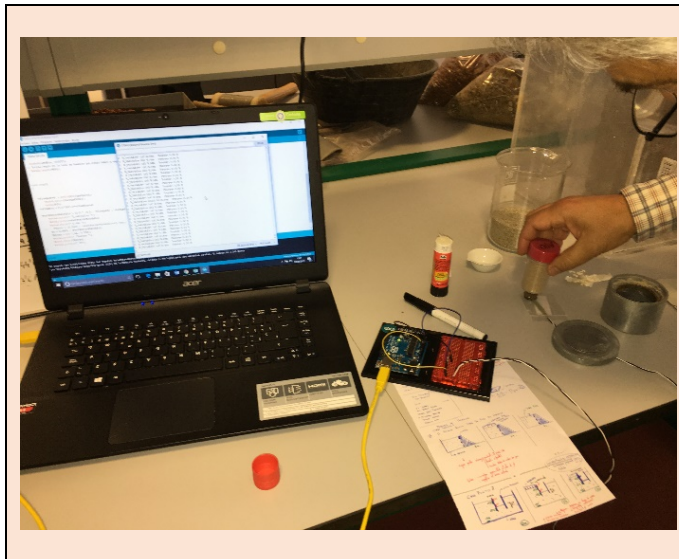


Figura 2. Comprobación de la calibración original de un sensor con la colocación de una masa de 100 g sobre ella.

$$\rho = \frac{M}{VOL} = \frac{M}{\text{ÁREA} \cdot \text{ALTURA}} = \frac{M}{LADO \cdot LADO \cdot \text{ALTURA}}$$

Para una mejor comprensión del proceso se muestran a continuación los datos experimentales obtenidos en una de estas calibraciones (Tabla 1) así como la curva obtenida para la relación entre resistividad y fuerza (Figura 4). La curva de regresión que se obtiene, resultado de la calibración, debe implementarse posteriormente en el programa de Arduino para que la lectura de fuerza sea correcta (ver 2.4).

ALTURA (cm)	MASA TOTAL (g)	MASA DE ARROZ (g)	SUPERFICIE DE LA URNA (cm <sup>2</sup> )	VOLUMEN DEL MATERIAL VERTIDO (cm <sup>3</sup> )	LECTURA DE RESISTIVIDAD (kΩ)	LECTURA DE FUERZA (N)	UNIDADES	DENSIDAD ARROZ COLOCADO (g/cm <sup>3</sup> )	FUERZA CALCULADA (N)
0	3973,3	0	800,89	0	0	0			0
5	7507,9	3534,6	800,89	4004,45	38,25	0,32	212	0,882668032	0,6084294
10	10836	6862,7	800,89	8008,9	19,83	0,5	345	0,856884216	1,2168588
15	14523,4	10550,1	800,89	12013,35	15,77	0,59	398	0,878198005	1,8252882

Tabla 1. Datos tomados para la calibración del sensor de fuerza. *Lectura de fuerza* representa la fuerza actuante en cada momento, considerando la calibración aportada por el fabricante. *Unidades*, entre 0 y 1023, es el intervalo de medida o de lecturas que interpreta el programa de Arduino.

Tanto el proceso de calibración como el de las pruebas piloto descritas pueden visualizarse a



través de <https://www.youtube.com/watch?v=C32uF0Kh2Vw> y <https://www.youtube.com/watch?v=HWza0vTMP6U>.



Figura 3. Pruebas efectuadas en urna de pequeñas dimensiones, con sensores de fuerza y empleando arroz como material de relleno. (A) urna vacía con sensor de fuerza adherido al fondo, todo colocado sobre una balanza; (B) detalle del sensor de fuerza; (C) urna con una altura de 15 cm de arroz; (D) equipo de calibración completo, con urna, balanza, ordenador y placa de Arduino.

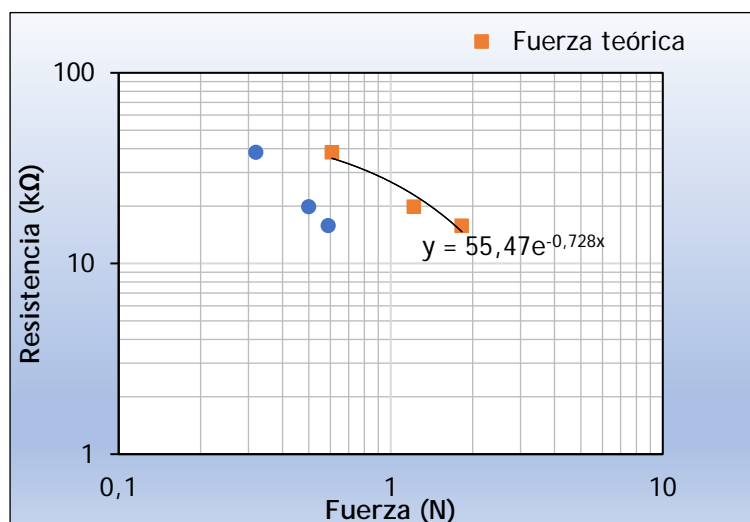


Figura 4. Curvas de calibración obtenidas para el sensor cuadrado de 38 x 38 mm.

## 2.3. Construcción de la urna

Tras las pruebas piloto, se consideró trabajar con un modelo que permitiese cargar suficientemente los sensores, para mejorar su respuesta. Así, se consideró un diseño consistente en una estructura exterior en forma de paralelepípedo ortogonal (recto u ortogonal), formado por seis caras iguales dos a dos. El proceso de montaje de la urna (Figura 5), sus partes principales, elementos auxiliares y herramientas a emplear (Figura 6) se enumeran a continuación. Este capítulo se complementa con una serie de videos que se han colgado de la plataforma Youtube para visualizar todo el proceso (<https://www.youtube.com/watch?v=7jf1rkhiqf4>).

- A. Base del modelo. Una placa de madera de dimensiones 870/330/19mm, en una de cuyas caras mayores se replantearon y luego excavaron cuatro surcos rectilíneos - tres longitudinales de 500 mm y uno transversal 295mm, todos ellos de 11 mm de profundidad y 6 mm de ancho- para alojar las caras verticales de poliver [(2)(3)(4)]. Se empleó para esta tarea una fresadora con una broca de ¼ de pulgada. En el tercio de tabla no ocupado por los surcos se hicieron cuatro perforaciones pasantes de 9 mm de diámetro para alojar los tornillos, roscas y arandelas respectivas que sirven para anclar a esta base dos escuadras en L y con anclaje metálico, de 200 x 300 mm, que dan soporte a la placa lateral de madera (5). Para evitar que estos tornillos sobresaliesen por la base de la placa se hicieron alojamientos con la ayuda de una paleta para taladro.
- B. Placa de poliver de 1000 x 500 x 5 mm. Se aloja o bien en uno de los surcos exteriores de la base del modelo, o bien en el central, según el volumen de terreno con el que se desee trabajar.
- C. Placa de poliver de 1000 x 200 x 5 mm. Se aloja en el surco más corto de los perforados en la base del modelo.
- D. Placa de poliver de 1000 x 500 x 5 mm. Se aloja en el otro surco exterior de la base del modelo.
- E. Lateral de madera. Placa de madera de dimensiones 1000 x 345 x 30 mm. Para evitar el colapso de la estructura cuando se rellene de material, se instalaron en una de sus caras mayores tres listones de madera de pino de 980 x 9 x 9 mm, adheridos a la misma por medio de cuatro puntas roscadas y cola de madera. Para colocar los tornillos roscados, previamente se hicieron las respectivas perforaciones con una broca de 3 mm, evitando de este modo que el roscado abriese la madera. Estos listones quedan en todos los casos por la parte exterior de las placas de poliver a las que dan soporte. De manera auxiliar, y para asegurar la estabilidad del modelo antes del llenado, se han adherido simplemente con cola dos listones del lado interior del alojamiento para las placas de poliver.
- F. Tapadera. Marco de madera, rectangular, de dimensiones 600 x 330 x 30 mm. En su interior se instalaron listones (madera de pino, de sección cuadrada 9 x 9 mm) a modo de guía para evitar la flexión excesiva de toda la estructura. Los listones se colocaron con la ayuda de puntas roscadas y de cola para madera.
- G. Placa de Poliver de 720 x 300 x 2,5 mm
- H. Placa de Poliver de 720 x 200 x 2,5 mm
- I. Tabla de madera de 720 x 300 x 19 mm
- J. Cilindros de madera de 28 mm de diámetro y 300 mm de largo.
- K. Muro en T.
- L. Muro de gravedad.
- M. Pie de laboratorio
- N. Cable
- O. Arduino.
- P. Placa de Arduino con acelerómetro.
- Q. Cuchara.
- R. Esquineros.
- S. Sargentos.
- T. Flexómetro.
- U. Cintas de amarre.





Figura 5. Proceso de construcción y montaje de la urna. De arriba abajo, y de izquierda a derecha, (A) replanteo de las piezas; (B) creación de surcos en la madera base con ayuda de una fresadora; (C) detalle de los surcos en los que se encajan los elementos de poliver; (D) colocación que listones de madera a modo de guía para los elementos de poliver; (E) ensamblaje de paredes laterales y colocación de escuadras de soporte; (F) urna construida y lista para su llenado.

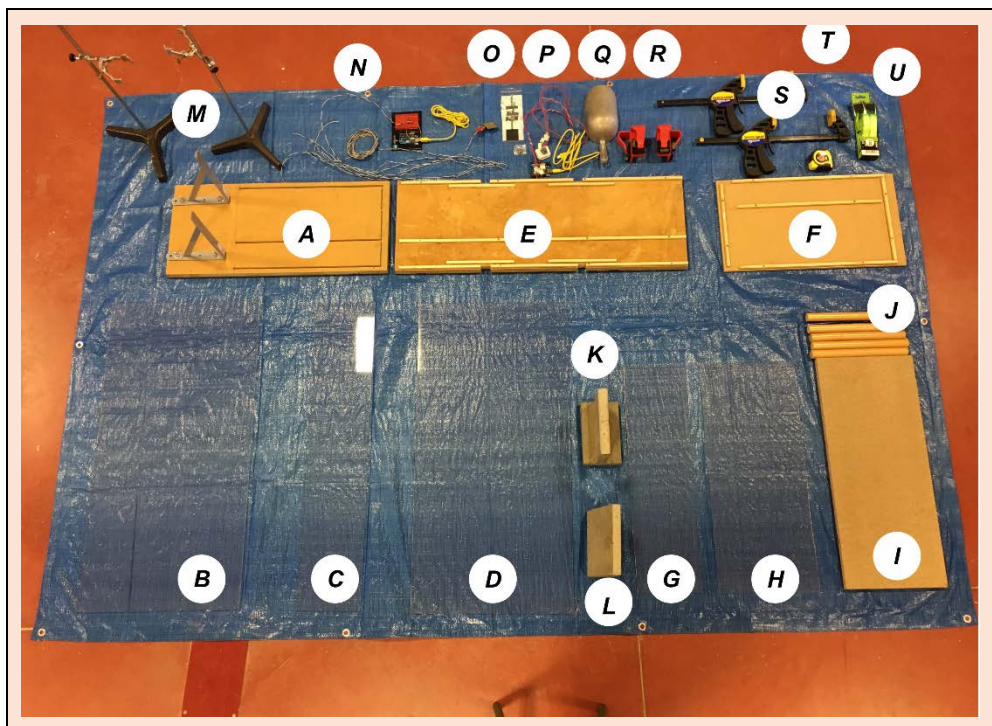


Figura 6. Piezas, elementos auxiliares y herramientas auxiliares para el montaje del modelo.

## 2.4. Implementación de la auscultación

Una de las novedades de este proyecto es el empleo de sensores electrónicos para comprobar o verificar el valor de algunos parámetros. En concreto, en este trabajo se han instalado dos sensores de fuerza para conocer las acciones del terreno contra la estructura en diferentes puntos de la misma (Sensores FSR).

Como ya se ha mencionado, todos los sensores se conectaron y controlaron a través de Arduino. En este capítulo se presentan los aspectos más singulares de este proceso.

### Algunos aspectos sobre el Arduino

Arduino es una plataforma de hardware y software libre basada en una placa con un microcontrolador y un entorno de desarrollo, toda ella diseñada para facilitar el uso de sistemas electrónicos en proyectos multidisciplinarios (<http://www.instructables.com/id/Arduino-Tutorial-0-Introducci%C3%B3n/>).

Consta de una placa (hardware) en la que se localiza además del microcontrolador, leds, resistencias, pulsadores, sensores... (Figura 7), y un software, este último gratuito y que se puede instalar en cualquier ordenador a través de <https://www.arduino.cc/en/main/software>. El lenguaje de programación que emplea se basa en Wiring y se puede considerar una versión simplificada de C++. Al ser un software libre y de uso extendido con fines didácticos, existen en la red abundantes documentos que ayudan a comprender mejor el funcionamiento y posibilidades de este dispositivo (<http://educacionadistancia.juntadeandalucia.es/profesorado/course/view.php?id=33>). El sistema empleado facilita la conexión a una amplia gama de sensores analógicos, lo que incrementa las posibilidades de implementación y mejora de prototipos.

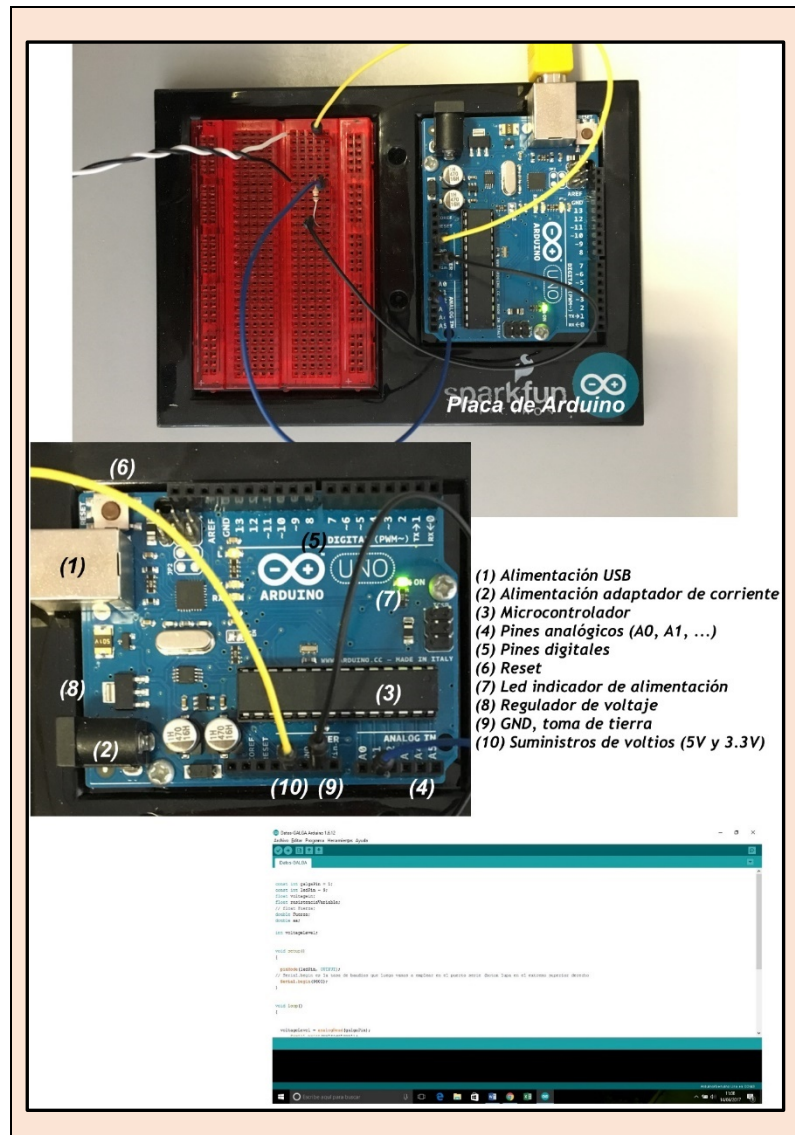


Figura 7. Placa electrónica y placa de Arduino (arriba), detalle de la placa de Arduino (centro), y software con parte del código empleado para este proyecto (abajo).

### Control de fuerza a través de Force Sensitive Resistor (FSR)

Este tipo de sensores permite detectar presión física o peso. Está compuesto de dos capas (Figura 8): a medida que aumenta la presión\*, el número de puntos que entran en contacto con la capa semiconductor aumenta y, por lo tanto, la resistencia que se mide va cayendo.

Son instrumentos muy baratos, pero, por el contrario, la precisión que aportan no es muy grande, de tal modo que las medidas con él tomadas deben ser entendidas como "rangos", más que datos precisos. En todo caso, dado el presupuesto, los datos técnicos aportados por el proveedor y el objetivo del trabajo, se consideró que eran los más adecuados.

\* A más presión, menor resistencia



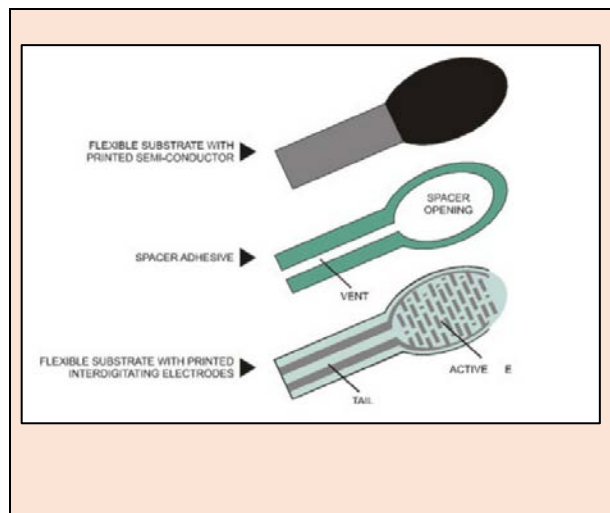


Figura 8. Esquema de un sensor FSR (tomada de [www.cetronic.es](http://www.cetronic.es)).

Algunos datos técnicos de estos dispositivos son:

- Rango de resistividades ( $k\Omega$ ). Trabajan midiendo resistencias desde infinito (circuito abierto),  $100\ k\Omega$  (presión débil) y  $200\ \Omega$  (presiones máximas).
- Rango de fuerzas (N). Desde 0 a 100 N, aplicados uniformemente sobre la superficie del sensor.
- Alimentación. Cualquiera, aunque sólo utiliza una corriente de menos de 1mA.

### Implementación de los sensores en los modelos

Los sensores FSR se instalaron en los dos modelos recreados: un muro y una pantalla. El montaje de estas dos simulaciones se presenta en el capítulo 3.4 y 3.5.

Para el modelo del muro se emplearon tres sensores. Dos se colocaron en el trasdós del muro -una superficie vertical de hormigón- con la ayuda de cinta aislante y con el objetivo de medir fuerzas horizontales. El tercer sensor se colocó también en el trasdós del muro pero en este caso en el fondo del modelo, de modo que midiese las fuerzas verticales. Los sensores se alimentaron a través del ordenador portátil, al que se unen por medio de una serie de cables convencionales que conectan sensores con placa electrónica, y ésta con la placa de Arduino, de donde parten las órdenes para tomar los datos. Con mayor detalle, y tomando como referencia la Figura 7, relativa a un único sensor, los cables negro y blanco que salen de cada sensor instalado en el modelo van a la placa electrónica roja. A esa misma placa se conecta un cable de color amarillo que va hacia la placa de Arduino, y que es la toma de tierra del circuito. Además, existe una resistencia a cuyos extremos se conecta un cable azul, que va a la entrada analógica A1 de la placa de Arduino, y un cable negro, que va al pin Vin, que proporciona la tensión al circuito. Para conectar los demás sensores, se repitió el mismo proceso, pero recurriendo a los pines libres A0, A2 y A3, y estableciendo puentes para que la tensión llegue a todos ellos.

En la pantalla se colocaron también tres sensores: dos de ellos en su trasdós - controlando así las fuerzas derivadas del empuje activo del terreno - y una tercera en el intradós, en la que actúa el empuje pasivo.

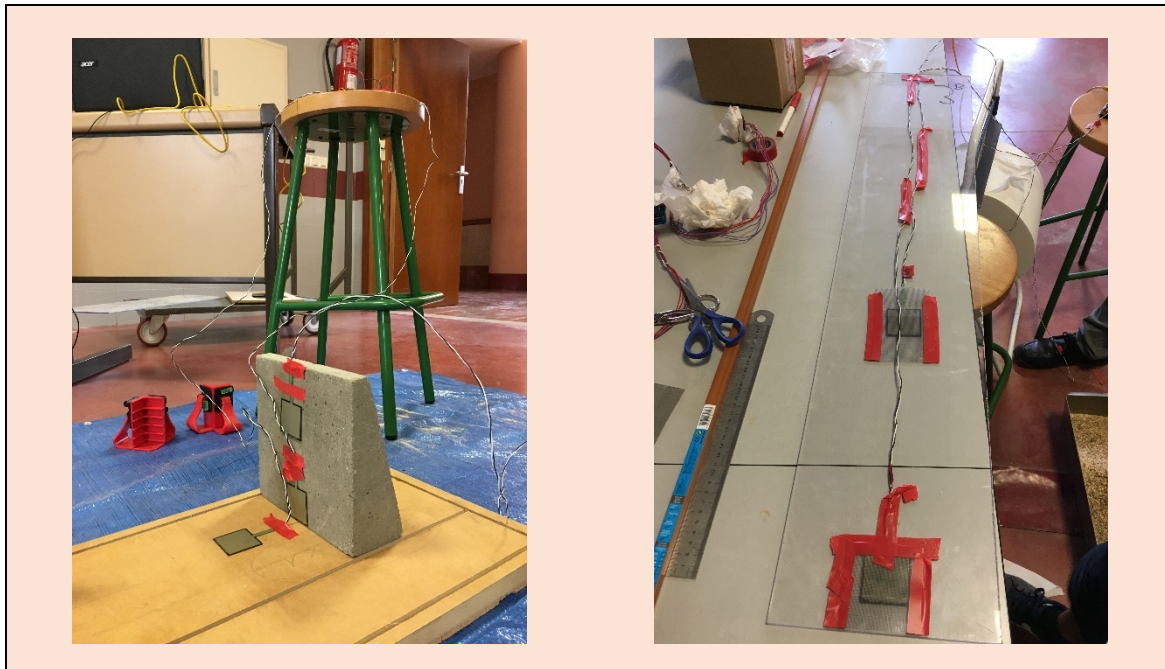


Figura 9. Izquierda, sensores colocados en el muro (dos) y en la base de las tierras (uno). A la derecha, lámina de poliver - actúa como pantalla de contención en el modelo - con dos sensores colocados uno en la base y el otro sobre su vertical y a 20 cm. El tercer sensor colocado no se observa en la imagen, ya que está también en la base, pero por la cara opuesta.

Como se ha comentado en este mismo capítulo, la toma de medidas de los sensores se controla por medio de un código creado en el entorno ARDUINO. El microcontrolador permite la representación de la medida en cada entrada analógica mediante 10 bits, lo que equivale a dividir el rango de lectura de un máximo de 5 V en 1023 unidades; así, el número entero 0 equivale a la medida de 0 V y el número entero 1023 equivale a la medida de 5 V. Los pines de entrada permiten la medida de valores de voltaje entre 0 y 5 V, de modo que para convertir esta señal se programa también la conversión al parámetro de medida en cuestión, en este caso N, a través de la curva de calibración del sensor obtenida previamente. Hay que recalcar de nuevo aquí que la calibración de los sensores de fuerza es especialmente importante. Este proceso se ha descrito con detalle en el capítulo 2.2.

El código creado para este proyecto se muestra a continuación:

```
const int galgaPin1 = 1;
const int galgaPin2 = 2;
const int galgaPin3 = 3;
const int ledPin = 9;
float voltagein;
float resistenciaVariable1;
float resistenciaVariable2;
float resistenciaVariable3;
// float Fuerza;
double Fuerza;
double aa;

int voltageLevel;

void setup()
{
  pinMode(ledPin, OUTPUT);
  // Serial.begin es la tasa de baudios que luego vamos a emplear en el puerto serie (boton lupa en el extremo superior derecho
  Serial.begin(9600);
}
void loop()
{
  voltageLevel = analogRead(galgaPin1);
  Serial.print(voltageLevel);
  delay(20000);
}
```



```

voltagein = 5.0/1023.0*voltageLevel;

resistenciaVariable1 = 10.0 * (5.0 - voltagein) / voltagein;
  Serial.print(" R_variable= ");
  Serial.print(resistenciaVariable1);
  Serial.print(" K.ohm ");
//  Fuerza = (7.3112 / resistenciaVariable1)**(0.691);
  aa = 7.3112 / resistenciaVariable1;
  Fuerza = pow ( aa, 0.691);
  Serial.print(" Fuerza1= ");
  Serial.print(Fuerza);
  Serial.println(" N");

voltageLevel = analogRead(galgaPin2);
  Serial.print(voltageLevel);
  delay(500);
voltagein = 5.0/1023.0*voltageLevel;

resistenciaVariable2 = 10.0 * (5.0 - voltagein) / voltagein;
  Serial.print(" R_variable= ");
  Serial.print(resistenciaVariable2);
  Serial.print(" K.ohm ");
//  Fuerza = (7.3112 / resistenciaVariable2)**(0.691);
  aa = 7.3112 / resistenciaVariable2;
  Fuerza = pow ( aa, 0.691);
  Serial.print(" Fuerza2= ");
  Serial.print(Fuerza);
  Serial.println(" N");

voltageLevel = analogRead(galgaPin3);
  Serial.print(voltageLevel);
  delay(500);
voltagein = 5.0/1023.0*voltageLevel;

resistenciaVariable3 = 10.0 * (5.0 - voltagein) / voltagein;
  Serial.print(" R_variable= ");
  Serial.print(resistenciaVariable3);
  Serial.print(" K.ohm ");
//  Fuerza = (7.3112 / resistenciaVariable3)**(0.691);
  aa = 7.3112 / resistenciaVariable3;
  Fuerza = pow ( aa, 0.691);
  Serial.print(" Fuerza3= ");
  Serial.print(Fuerza);
  Serial.println(" N");
}

```

---

## 2.5. El llenado del modelo

La fase final del proceso de construcción terminó con el llenado de la urna, en la que ya se incluyen también los elementos de contención (Figura 10). Éste puede realizarse a través de un vertido desde la zona superior de la estructura creada, colocando para ello la pieza (F), hueca internamente, para facilitararlo y aportar estabilidad (Figura 6). No obstante, para construir el modelo del empuje sobre un muro, esta pieza no es necesaria.



Figura 10. Material para simular el terreno: arenas procedentes de la gravera de Fresno de la Ribera (arriba). Modelo de empuje de tierras sobre muro de gravedad, con la auscultación instalada y, a la derecha, el mismo muro pero ya desequilibrado por la colocación de un sobrecarga (centro). Modelo de pantalla en su fase inicial, con la lámina de poliver colocada sobre las arenas y, a la derecha, el modelo ya construido y en equilibrio (abajo).

## 3. EL WORKSHOP

### 3.1. Introducción

Este Workshop se basa en la construcción de modelos de obra reales con los que trabajar los contenidos relacionados con los empujes del terreno. Aunque está creado para los estudiantes de la Escuela Politécnica Superior de Zamora, también es válido para ser aplicado en otros grados, como son Ingeniería Geológica o Geología, en Salamanca, además lógicamente del Grado de Ingeniería Civil de la Escuela Politécnica Superior de Ávila. Involucra a las asignaturas de Geotecnia II, Geología (Grado de Ingeniería Civil) y Mecánica de Suelos y Cimentaciones (Grado de Arquitectura Técnica) Pero, además, al incluir una componente electrónica importante, puede servir también para las asignaturas de Fundamentos de Ingeniería Mecánica y Electrónica de Sistemas Mecánicos - especialmente en esta última, ya que en ella se estudia el uso de sensores y el diseño de sistemas embebidos microcontrolados), ambas pertenecientes al Grado de Ingeniería Mecánica (asignaturas.. Tomando en consideración el Grado de Ingeniería Civil, este WORKSHOP trabaja las competencias específicas CE 25<sup>1</sup> y CE 11<sup>2</sup>, y las transversales CT 3<sup>3</sup> y CT 4<sup>4</sup>.

Al igual que ocurre en el desarrollo constructivo de muchas obras, los modelos incorporan instrumentación electrónica que controla parámetros relevantes para la bondad y la seguridad del diseño concebido. Esta instrumentación en este caso servirá además para fomentar el espíritu crítico entre los que afronten esta metodología, al situarlos frente al contraste en medidas reales y teóricas. Cuando ambas no coinciden, de manera automática surge la necesidad de buscar explicaciones, de dar soluciones alternativas... en definitiva, de ir más allá que la mera resolución numérica de un planteamiento teórico.

Desde el punto de vista del planteamiento didáctico, y tomando como referencia las actividades recogidas en Bernal (2017), la estructura del Workshop planteado incluye:

- **Evaluación Inicial:** establece los conocimientos de partida que trae el alumno. Se plantean como pruebas objetivas de tipo test, que incluyen preguntas abiertas y cerradas con diferentes alternativas de respuestas.
- **Actividad teórica** impartida a través de una sesión magistral en la que se presentan los conceptos a manejar.
- **Trabajo sobre modelo**
  - o Problema práctico: diseño analítico o resolución de un problema analítico convencional, aunque en este caso centrado en el modelo. Se simula, al menos parcialmente, lo que sería una fase de proyecto, dentro de una obra.
  - o Problema constructivo: construcción del modelo y planteamiento de incógnitas, alternativas, efectos... Se simula una fase de construcción, en la que se puede requerir más información de la aportada por el proyecto previamente (en este caso, por la resolución del problema práctico).
  - o Evaluación intermedia: a través de preguntas, se retroalimenta el aprendizaje
  - o Evaluación Final: Prueba práctica consistente en la emisión de un informe sobre la actividad.

---

<sup>1</sup> Capacidad para la construcción de obras geotécnicas.

<sup>2</sup> Conocimientos de geotecnia y mecánica de suelos y de rocas, así como su aplicación en el desarrollo de estudios, proyectos, construcciones y explotaciones donde sea necesario efectuar movimientos de tierras, cimentaciones y estructuras de contención.

<sup>3</sup> Que los estudiantes tengan la capacidad de reunir e interpretar datos relevantes dentro del ámbito de la Ingeniería Civil para emitir juicios que incluyan una reflexión sobre temas relevantes de índole social, científica o ética.

<sup>4</sup> Que los estudiantes puedan transmitir información, ideas, problemas y soluciones a un público tanto especializado como no especializado.

Todas estas actividades se desarrollan a lo largo de tres horas presenciales, siguiendo el cronograma adjunto (Tabla 2).

DESCRIPCIÓN		1ª HORA				2ª HORA				3ª HORA			
		0-15	15-30	30-45	45-60	0-15	15-30	30-45	45-60	0-15	15-30	30-45	45-60
Evaluación inicial													
Sesión magistral													
Trabajo sobre el modelo	Diseño analítico												
	Construcción del modelo												
	Toma de datos												
	Evaluación intermedia												
	Informe												

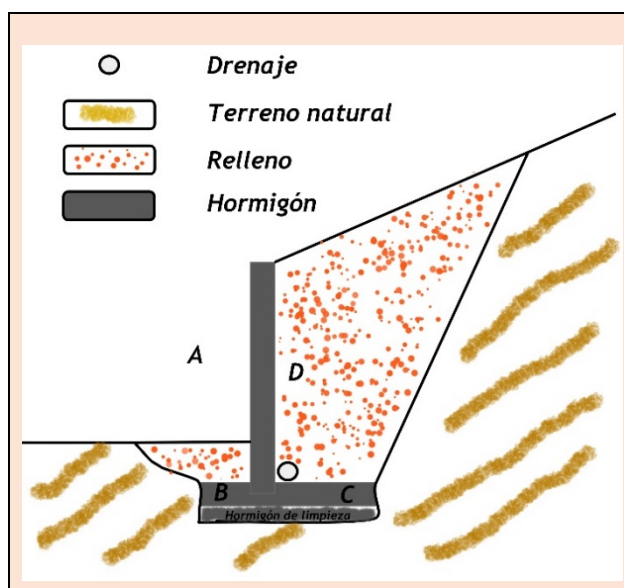
Tabla 2. Cronograma que contempla el desarrollo del workshop a lo largo de una sesión de tres horas.

### 3.2. Evaluación inicial

Para darle una mayor agilidad y capacidad de interacción, se propone emplear Mentimeter (<https://www.mentimeter.com/>) (Figura 11), lo que facilitará la contextualización general del grupo, para el profesor, e individual, para el alumno.

Las cuestiones propuestas, algunas abiertas y otras de selección, son las siguientes:

- Las estructuras de contención se suelen construir con hormigón, ya que es la elevada resistencia de éste la que aporta estabilidad al conjunto tierra-estructura.
  - Verdadero
  - Falso
- Desde el punto de vista geotécnico, ¿qué posibles fallos crees que se deben analizar en toda estructura de contención de tierras?
  - Respuesta abierta
- ¿Qué diferencias encuentras entre un muro y una pantalla?
  - Respuesta abierta
- ¿Qué parámetros geotécnicos crees que van a condicionar la estabilidad del terreno?
  - Respuesta abierta
- En la imagen, el trasdós de la estructura tiene asignada la letra...
  - A
  - B
  - C
  - D
- En la misma imagen, la puntera de la estructura tiene asignada la letra...
  - A
  - B
  - C
  - D



7. El empuje unitario activo que existe en un punto del suelo, y a poca profundidad, es ... que la tensión vertical (considerar terreno granular).
  - a. mayor
  - b. igual
  - c. menor
8. El empuje unitario pasivo que existe en un punto del suelo y a poca profundidad es ... que la tensión vertical (considerar terreno granular).
  - a. mayor
  - b. igual
  - c. menor
9. Para una misma profundidad, y en la zona del trasdós de una estructura de contención, ¿qué terreno “empuja” más hacia el desequilibrio, uno granular o uno cohesivo? Supón que el ángulo de rozamiento interno es el mismo para ambos terrenos
  - a. granular.
  - b. cohesivo.
  - c. por igual.
  - d. depende de cada caso.
10. ¿Cómo calcularías el empuje de las tierras sobre una estructura?
  - a. Respuesta abierta.



Figura 11. Captura de pantalla de Mentimeter (<https://www.mentimeter.com/app>), en donde se muestra una de las preguntas planteadas y las opciones de respuesta.

### 3.3. Conceptos teóricos

Tras la evaluación inicial, a continuación, se impartirá una sesión magistral sobre los conceptos principales a manejar:

- Empuje activo
- Empuje pasivo
- Tipología de estructuras
- Problema básico muro
- Problema básico de pantallas

Se considera que, en esta fase, más que profundizar, se debe hacer hincapié en los aspectos básicos (cálculo de empujes, situación de vuelco y de deslizamiento de la base), y no se entrará en cálculos de capacidad de carga vertical, que se trabajan en otras sesiones.



### 3.4. Trabajo sobre el modelo de un muro de contención: los empujes activos del terreno sobre un muro de gravedad.

#### Introducción

El primer paso para poder diseñar cualquier estructura de contención de tierras es conocer las fuerzas o tensiones que sobre ésta van a actuar. Este primer modelo tiene como objetivo aplicar los procedimientos analíticos que permiten estimar estas sollicitaciones, y comprobar la idoneidad (o no) de los mismos.

En esta clase se deberá construir el modelo, realizar los cálculos indicados y registrar los valores reales medidos con la ayuda de los dispositivos electrónicos instalados.

Con todos estos datos, se deberá redactar un informe técnico sobre el caso planteado. Debe estar bien organizado, claramente expuesto y editado, sin faltas de ortografía ni incoherencias gramaticales o sintácticas, e incluirá los esquemas e imágenes necesarios para que cualquier revisor pueda verificar y/o contrastar todos y cada uno de los pasos seguidos en el proceso de cálculo. Se valorará especialmente la discusión y las conclusiones extraídas. A modo de ayuda, se propone emplear el guion recogido en la Tabla 3.

	TÍTULO	CONTENIDO. Extensión aproximada
1	Introducción	Presentación del informe. <i>Media página.</i>
2	Metodología	En este apartado se indican y explican los procedimientos de cálculo a emplear (formulaciones o hipótesis) y el método elegido para auscultar la obra, del que se debe explicar también, y de manera breve, sus principios de funcionamiento. <i>Una página.</i>
	2.1. Cálculo analítico	
	2.2. Medidas de auscultación	
3.	Resultados	Resultados obtenidos tanto analíticos como de auscultación. Los primeros deben ir acompañados de esquemas que recojan toda la información necesaria para seguir el proceso de cálculo (cotas, parámetros,...). <i>Dos páginas.</i>
4.	Discusión de los resultados	Comparar los resultados obtenidos en ambos métodos y explicar las posibles diferencias que pudieran existir, razonando si las posibles desviaciones son aceptables o no desde el punto de vista ingenieril. <i>Una página.</i>
5.	Conclusiones	Recoger las conclusiones a las que se haya llegado. <i>Media página.</i>

Tabla 3. Guion propuesto para la redacción del informe técnico.

#### Presentación del modelo

Construye\* el modelo analógico que representa un muro de gravedad que soporta el empuje de un nivel de suelo granular (Figura 12).

A continuación, calcula y representa la variación del empuje activo unitario a lo largo del trasdós del muro, y anota los valores localizados en las zonas representadas en el esquema. Para este paso, indica los parámetros que necesitas, y justifica los valores que para ellos adoptes. Emplea para ello la Tabla 4.

Una vez concluido este proceso, y empleando la instrumentación colocada en la cara interna del muro, registra los valores de fuerza o presión unitaria que indican cada uno de los puntos de control.

Una vez concluida la primera parte de este caso, modifica el modelo incluyendo la sobrecarga que se recoge en el plano aportado (Figura 12). Para esta nueva situación debes analizar y registrar igualmente los empujes teóricos y los realmente registrados.

---

\* Antes lee (y plantea) el párrafo siguiente, que resultará de ayuda para resolver mejor este caso.

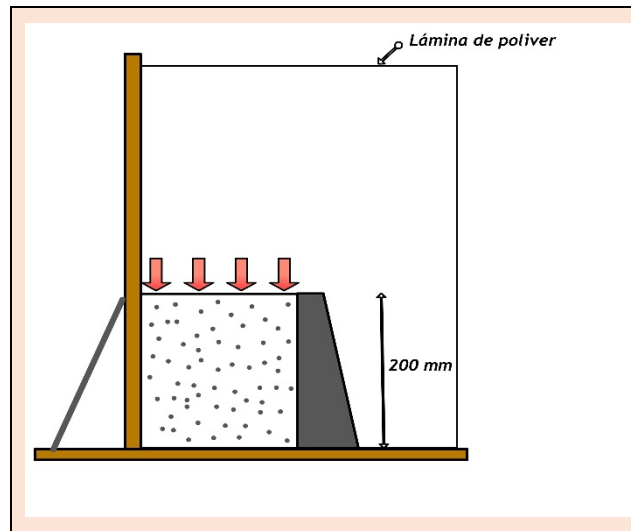


Figura 12. Plano para la construcción del modelo analógico para empujes activos o Modelo 1.

MODELO	PUNTO DE CONTROL (Z)(m)	TENSIONES		FUERZAS TEÓRICAS	
		$\sigma_v = \gamma \cdot z$	$\sigma_H = \sigma_v \cdot k_a$	FUERZA TEÓRICA EN SENSORES ( $F = \sigma \cdot SUP$ )	
				$F_v$	$F_H$
Modelo 1					

Tabla 4. Hoja para el registro de empujes en el Modelo 1.

### Otras posibles variaciones sobre el Caso 1<sup>a</sup>.

- Perfil del terreno formado por dos capas de propiedades distintas (arena y arcilla; arena y serrín; ...)
- Efecto de existencia de una de una sobrecarga puntual.
- Efecto de existencia de una de una sobrecarga lineal.
- Efecto de existencia de una de una sobrecarga en faja o distribuida.

### Resolución de referencia

- El primer paso es la determinación del peso específico de la arena, para lo cual se llena con arena vertida el cubo abierto empleado en la fase de pruebas, y tomando como valor representativo o característico el resultante del promedio de las densidades medidas multiplicado por un valor de gravedad de  $9,81 \text{ m/s}^2$  (Tabla 5).

ALTURA DE ARENA (cm)	MASA DE ARENA (g)	DENSIDAD ( $\text{g/cm}^3$ )	PESO ESPECÍFICO ( $\text{kN/m}^3$ )
4,7	5087,4	1,37	13,45
7	8196,2	1,48	14,55
8,8	10206	1,47	14,41
PROMEDIO		1,44	14,1

Tabla 5. Calibración simultánea de los tres sensores de fuerzas y determinación del peso específico de la arena.

- Posteriormente, es necesario hacer una calibración simultánea de los sensores a emplear. Los datos tomados en la prueba efectuada han sido los siguientes (Tabla 6) (Figura 13):

ALTURA (cm)	SUPERFICIE (cm <sup>2</sup> )	V (cm <sup>3</sup> )	SENSOR DE FUERZA 1		SENSOR DE FUERZA 2		SENSOR DE FUERZA 3		FUERZA CALCULADA (V·ρ·g)(N)
			Resistividad (kΩ)	Fuerza (N)	Resistividad (kΩ)	Fuerza (N)	Resistividad (kΩ)	Fuerza (N)	
0	800,89	0	0	0	0	0	0	0	0
5	800,89	4004,45	140,44	0,13	0	0	0	0	1,03968
10	800,89	8008,9	16,54	0,57	0	0	36,08	0,33	2,07936
15	800,89	12013,35	9,45	0,84	0	0	17,14	0,56	3,11904
20	800,89	16017,8	6,83	1,05	0	0	14,07	0,64	4,15872
25	800,89	20022,25	5,18	1,27	0	0	12,05	0,71	5,1984

Tabla 6. Datos de calibración para el Modelo 1.

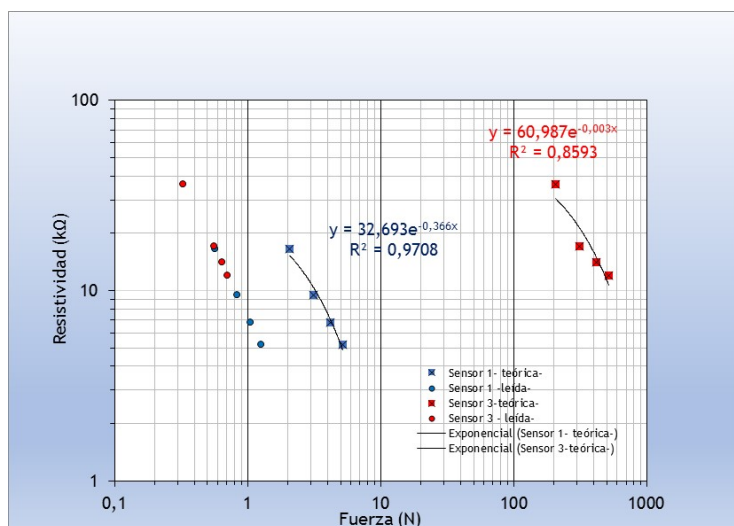


Figura 13. Calibración simultánea de los tres sensores.

- El siguiente paso consiste en adecuar la programación en Arduino para la nueva calibración (según los coeficientes de las rectas exponenciales de mejor ajuste). Una vez completado, se construye el modelo, con los sensores instalados en el muro, y se toman las lecturas (Tabla 7).

DESCRIPCIÓN DEL SENSOR	FUERZA MEDIDA (N)	FUERZA MEDIDA CON SOBRECARGA (N)
Sensor de fondo, Horizontal, para medir fuerzas verticales, en la zona de fondo.	1,22	1,8
Sensor de fondo, Vertical_SUP, para medir fuerzas horizontales cerca de la superficie.	0	0
Sensor de fondo, Vertical_INF, para medir fuerzas horizontales la zona de fondo.	0,54	0,74

Tabla 7. Toma de datos.

La Resolución analítica comienza planteando las ecuaciones a manejar y los parámetros característicos del terreno:

- Tensiones verticales:  $\sigma_v = \gamma \cdot z$
- Tensiones horizontales para un suelo sin cohesión (arenas):  $\sigma_H = \sigma_v \cdot k_a$
- Coefficiente de empuje activo:  $k_a = \frac{1 - \sin(\phi)}{1 + \sin(\phi)}$
- Parámetros:
  - ángulo de rozamiento de las arenas  $33^\circ$
  - Peso específico de las arenas  $14,1 \text{ kN/m}^3$

Con estas premisas, se pasa al cálculo las tensiones verticales y horizontales, y con ello de las fuerzas, asumiendo que las tensiones actúan sobre la superficie delimitada por el sensor (superficie cuadrada de 38,1 mm de lado). Los resultados que se obtienen son los siguientes (Tabla 8):

MODELO	PUNTO DE CONTROL (Z)(m)	TENSIONES		FUERZAS TEÓRICAS	
		Verticales	Horizontales	FUERZA TEÓRICA EN SENSORES ( $F = \sigma \cdot SUP = \sigma \cdot 0,038 \cdot 0,038 \cdot 1000$ )	
				$F_v$	$F_H$
Modelo 1	0 (Punto A)	0 kPa	0 kPa	0	0
	0,019 (Punto B)	0,2679 kPa	0,079 kPa	0,387 N	0,115 N (0 N medidos)
	0,20(Punto C)	2,82 kPa	0,8319 kPa	4,07 N (1,22 N medidos)	1,20 N (0,54 N medidos)

Tabla 8. Cálculo de las tensiones y fuerzas en los sensores según la teoría. Entre paréntesis, fuerzas medidas en los sensores.

Comparando vemos que la fuerza vertical, medida a una profundidad de 0,20 m, analíticamente debería ser de 4,07 N, y el sensor marca 1,22 N. Respecto a las fuerzas horizontales, de nuevo el sensor indica un valor mucho más bajo que el teórico, 0,54 frente al esperado de 1,20 N. Finalmente, en la parte superior del muro, a apenas 2 cm de profundidad, la fuerza teórica resulta muy baja, 0,115 N, lo que sitúa al sensor en el límite de su rango inferior de medida.

De todo ello se puede concluir que los cálculos analíticos están del lado de la seguridad, aunque existe una divergencia entre ellos y la realidad. Esto puede obedecer al efecto borde que hace que parte de la presión vertical que debería actuar sobre el sensor esté siendo repartida hacia las zonas de los extremos. Por otro lado, todos los datos son coherentes, ya que la fuerza vertical es mayor que la horizontal para una misma cota. No hay que destacar tampoco posibles errores en las medidas del sensor, que por diversas circunstancias podrían estar midiendo de manera anómala; esta hipótesis se apoya en el hecho de que, durante la construcción del modelo, alguna partícula de arena pueda llegar a situarse entre el muro y los sensores, disfrazando las medidas de éstos.

Finalmente, la colocación en superficie de una sobrecarga de 7143 g (repartidas en una superficie circular de 5 cm de diámetro) se manifiesta con un aumento en las medidas de los sensores (modelo 1b)(Tabla 9). Así, el de fuerza vertical, que debería marcar 30 N, pasa a 1,8 N, mientras que el empuje horizontal en el fondo, antes de 0,54 N, pasa a 0,74 N (el valor analítico esperado es de 8,9 N).

Z (m)	$\sigma_v = q + \gamma \cdot z$ $= 17,84 + 14,1 \cdot z$	$\sigma_H = \sigma_v \cdot k_a$ $= (17,84 + 14,1 \cdot z) \cdot 0,295$	FUERZA TEÓRICA EN SENSORES ( $F = \sigma \cdot SUP = \sigma \cdot 0,038 \cdot 0,038 \cdot 1000$ )	
			$F_v$	$F_H$
0 (Punto A)	17,84 kPa	5,26 kPa	-	-
0,019 (Punto B)	18,11 kPa	5,34 kPa	-	-
0,20(Punto C)	20,66 kPa	6,10 kPa	30 N (marca 1,8 N)	8,9 N (marca 0,74)

Tabla 9. Cálculo de las tensiones y fuerzas en los sensores según la teoría para el modelo 1b.

El proceso constructivo del modelo puede verse en <https://www.youtube.com/watch?v=5Ht7wneeQf8>.

### 3.5. Trabajo sobre el modelo de una pantalla: los empujes activos y pasivos.

#### Introducción al caso planteado

Aunque cuentan con la ventaja de que las excavaciones así realizadas mueven un menor volumen de terreno, las paredes verticales son siempre más inestables que las paredes inclinadas y, por ello, son a priori estas últimas las adoptadas por razones de estabilidad y coste para una excavación. Sin embargo, en una obra se dan frecuentemente situaciones o contextos en los que no es posible excavar taludes inclinados, siendo necesario recurrir a paredes verticales cuya estabilidad debe asegurarse. Esto ocurre frecuentemente en entornos urbanos, donde el área a excavar está limitada por el límite de la parcela en la que se actúa, y también por la necesidad de limitar al máximo los desplazamientos inducidos por nuestra excavación en otras estructuras próximas. Como solución a estas circunstancias, se construyen estructuras de tipo pantalla, que tiene la singularidad de ejecutarse antes de la propia excavación del vaciado.

El primer paso para diseñar cualquier estructura de contención de tierras es conocer las fuerzas o tensiones que sobre ésta van a actuar. Este primer modelo tiene como objetivo aplicar los procedimientos analíticos que permiten estimar estas solicitaciones, y comprobar la idoneidad (o no) de los mismos, contrastando todo ello con las medidas aportadas por la auscultación electrónica que se implementa. A partir de un modelo de perfil del terreno homogéneo, se deberá primero calcular el empotramiento de la pantalla para que la estructura representada en la Figura 14 que sea estable, considerando el factor de seguridad que para estos casos indica el CTE DB SE-C. Posteriormente, en el interior de la urna se deberá “ejecutar la obra” de acuerdo a diseño, verificando así la bondad del análisis efectuado previamente. Durante el proceso constructivo se instalarán los equipos de auscultación que permitan medir empujes sobre la pantalla en al menos dos puntos ubicados a distintas cotas, y el movimiento en la pantalla, empleando para esto último la ayuda de acelerómetros.

Con todos estos datos, se deberá redactar un informe técnico sobre el caso planteado. Debe estar bien organizado, claramente expuesto y editado, sin faltas de ortografía ni incoherencias gramaticales o sintácticas, e incluirá los esquemas e imágenes necesarios para que cualquier revisor pueda verificar y/o contrastar todos y cada uno de los pasos seguidos en el proceso de cálculo. Se valorará especialmente la discusión y las conclusiones extraídas. A modo de ayuda, se propone emplear el guión recogido en la Tabla 10.

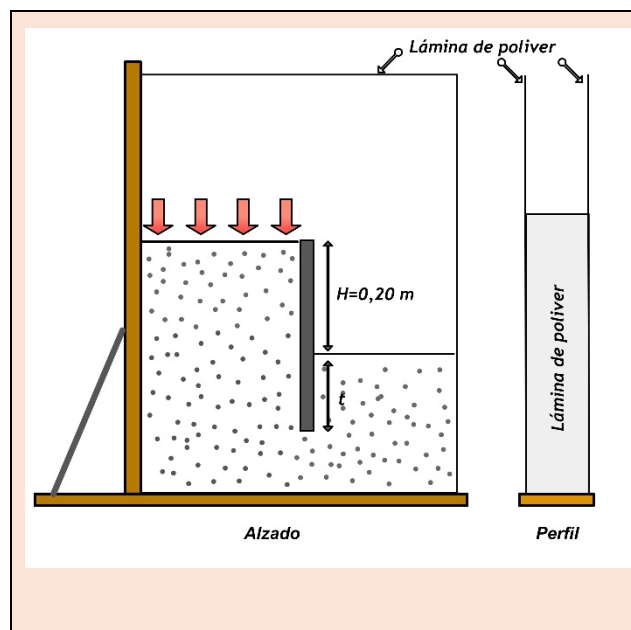


Figura 14. Plano para la construcción del modelo analógico para pantallas, o Modelo 2.



	TÍTULO	CONTENIDO. Extensión aproximada
1.	Introducción	Presentación del informe. <i>Media página.</i>
2.	Metodología	En este apartado se indican y explican los procedimientos de cálculo a emplear (formulaciones o hipótesis) y el método elegido para auscultar la obra, del que se debe explicar también y, de manera breve, sus principios de funcionamiento. <i>Una página.</i>
	2.1. Cálculo analítico	
	2.2. Medidas de auscultación	
3.	Resultados	Resultados obtenidos tanto analíticos como de auscultación. Los primeros deben ir acompañados de esquemas que recojan toda la información necesaria para seguir el proceso de cálculo (cotas, parámetros,...). <i>Dos páginas.</i>
4.	Discusión de los resultados	Comparar los resultados obtenidos en ambos métodos y explicar las posibles diferencias que pudieran existir, razonando si las posibles desviaciones son aceptables o no desde el punto de vista ingenieril. <i>Una página.</i>
5.	Conclusiones	Recoger las conclusiones a las que haya llegado. <i>Media página.</i>

Tabla 10. Propuesta de guion.

### Enunciado para los alumnos

A partir del plano de la Figura 14, que representa un vaciado para la construcción de un parking en un entorno urbano con una profundidad de 0,2 m<sup>1</sup>, estudia la profundidad de empotramiento necesaria para que la pantalla sea estable -considerando el FS que marca el CTE- y calcula la distribución de tensiones verticales efectivas y empujes activo y pasivo a ambos lados de la pantalla (estos últimos con y sin FS). Para este paso, indica los parámetros que necesitas, y justifica los valores que para ellos adoptes.

Una vez concluida la parte analítica, construye el modelo analógico, asegurándote de que la pantalla quede con el empotramiento obtenido en el paso anterior. Los equipos de auscultación incorporados a la construcción servirán para registrar los valores de fuerza o presión unitaria en varios puntos de control.

### Otras posibles variaciones

Además de las variaciones relativas a modificaciones en la profundidad de la excavación, este mismo caso admite modificar el tipo de pantalla. Por ejemplo, considerar pantalla de pilotes de madera tangentes, pantalla de pilotes de madera secantes o pantalla de pilotes metálicos

### Resolución de referencia

- El equilibrio de una pantalla en voladizo se calcula a partir de la hipótesis de Blum, que supone que el punto de giro de la pantalla se sitúa en su base (aunque en realidad se encuentra un poco por encima de ésta). A partir de esta hipótesis, se establece el equilibrio de momentos en la base. Para el caso planteado, con H=0,20 m, la igualdad se expresaría del siguiente modo:

$$\sum M_0 = 0$$

- El empuje activo, ejercido por el terreno sobre la pantalla a lo largo de toda la longitud de ésta, genera un momento de giro en sentido horario (según el esquema del modelo propuesto) que tiende a desequilibrar la estructura. En realidad, a lo largo de la pantalla el empuje horizontal unitario crece de manera lineal con la profundidad, de tal manera que la fuerza resultante, que se denomina empuje activo, se obtiene de la suma de los incrementos de empuje unitario, de tal modo que:

$$e_a = \gamma \cdot K_a = \gamma \cdot z \cdot K_a$$

<sup>1</sup> Variable que podrá modificarse según se estime.

$$ea = \int_0^{H+t} \gamma \cdot z \cdot K_a \cdot dz = \gamma \cdot K_a \cdot \left[ \frac{z^2}{2} \right]_0^{H+t} = \gamma \cdot K_a \cdot \frac{(H+t)^2}{2}$$

- Por el contrario, el empuje pasivo, ejercido por el terreno que se sitúa en el intradós de la pantalla, y por lo tanto únicamente en su zona empotrada, genera un momento de giro en sentido antihorario (según el esquema del modelo propuesto) que tiende a equilibrar la estructura.
- En la Figura 15 se han representado los valores calculados tanto del empuje activo como del pasivo.

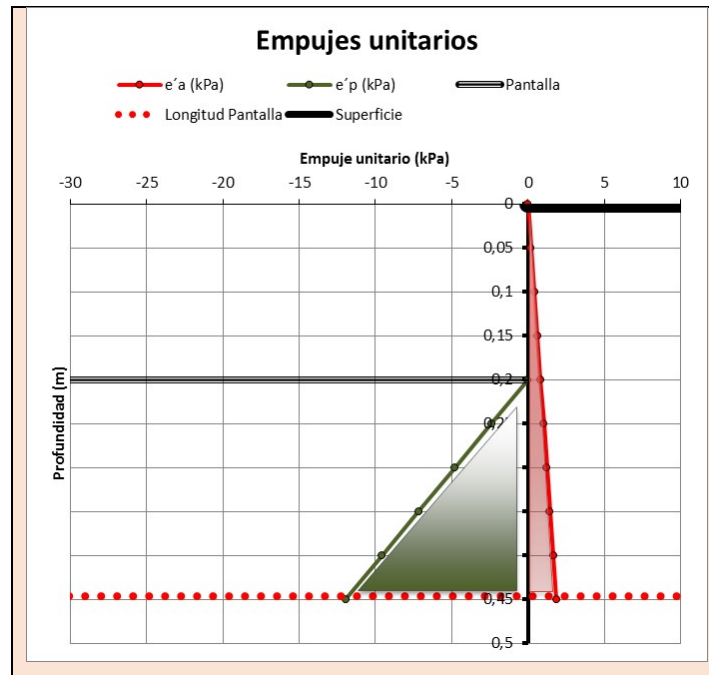


Figura 15. Representación gráfica del cálculo analítico de los empujes unitarios esperados.

- Por otro lado, la profundidad de empotramiento se puede extraer de manera rápida considerando el equilibrio de momentos en la base de la pantalla, y asumiendo que el punto de giro de la pantalla se encuentra en su misma base. En este caso, y para un perfil homogéneo del terreno, seco y sin sobrecargas, el empotramiento con el que se alcanza la situación de equilibrio límite es:

$$t = \frac{H}{\sqrt[3]{\frac{K_p}{K_a}} - 1}$$

, siendo

t(m), empotramiento de la pantalla medido desde el fondo de la excavación

H(m): profundidad de la excavación requerida

K<sub>p</sub>: coeficiente de empuje pasivo

K<sub>a</sub>: coeficiente de empuje activo

- En la Tabla 11 se recogen las longitudes de pantalla resultantes para la profundidad de excavación propuesta, y con diez posibles valores del ángulo de rozamiento interno (se ha señalado el considerado para este ejemplo). Los cálculos cubren la

situación de equilibrio límite sin considerar factor de seguridad alguno, y considerándolo de acuerdo el CTE, lo que implica un coeficiente de 0,67 para el empuje pasivo.

VARIABLES				SIN FS			CON FS (CTE)		
H (m)	$\Phi^\circ$	Ka	Kp	t (m) (sin minorar pasivo)	t·1,2	Lp (m)	t (m) (minorando el pasivo)	t·1,2	Lp (m)
0,20	30	0,333	3,000	0,19	0,22	0,42	0,24	0,29	0,49
	31	0,320	3,124	0,18	0,21	0,41	0,23	0,28	0,48
	32	0,307	3,255	0,17	0,20	0,40	0,22	0,26	0,46
	<b>33</b>	<b>0,295</b>	<b>3,392</b>	<b>0,16</b>	<b>0,19</b>	<b>0,39</b>	<b>0,21</b>	<b>0,25</b>	<b>0,45</b>
	34	0,283	3,537	0,15	0,18	0,38	0,19	0,23	0,43
	35	0,271	3,690	0,14	0,17	0,37	0,18	0,22	0,42
	36	0,260	3,852	0,14	0,16	0,36	0,17	0,21	0,41

Tabla 11. Cálculo analítico de las longitudes de empotramiento y de pantalla para pantallas construidas en excavaciones de 0,20, 0,30 y 0,35 m de profundidad. Se considera un rango de variación del ángulo de rozamiento interno de entre 25° y 36°.

- La auscultación ha reportado los siguientes datos (Tabla 12):

MODELO	PUNTO DE CONTROL (Z)(m)	TENSIONES		FUERZAS TEÓRICAS	
		Verticales	Horizontales	FUERZA TEÓRICA EN SENSORES ( $F = \sigma \cdot SUP = \sigma \cdot 0,038 \cdot 0,038 \cdot 1000$ )	
				F <sub>V</sub>	F <sub>H</sub>
Modelo 2	0,12 (Punto A, lado activo)	14,1·0,12=1,7 kPa	14,1·Ka·0,12=0,50 kPa	-	0,72 N (1 N medido)
	0,42 (Punto B)(lado activo)	14,1·0,42= 5,9 kPa	14,1·Ka·0,42=1,75 kPa	-	2,53 N (0,78 N medido)
	0,42 (lado pasivo)	14,1·(0,42-0,20)=3,1 kPa	14,1·Kp·(0,42-0,20)=10,5 kPa	-	15,2 N (sin señal)

Tabla 12. Empujes calculados analíticamente y empujes medidos con la ayuda de los sensores.

- Los valores obtenidos muestran una gran divergencia entre lo esperado y lo medido, y además de no adecuarse numéricamente, no muestran el comportamiento esperado. No obstante, el modelo se comporta adecuadamente (resiste).

El proceso constructivo del modelo puede verse en <https://youtu.be/7mf7qjBtOxQ>.

### 3.6. Evaluación intermedia (formativa)

Dentro de este apartado, se contemplará también que los alumnos que hayan trabajado en modelos diferentes, expongan en público su modelo con el fin de que los demás compañeros puedan hacerles sugerencias de mejora o corrección.

Las cuestiones que plantea esta segunda evaluación son las siguientes:

- En una excavación no muy profunda, apantallada, a priori, ¿dónde colocarías un anclaje para dar mayor resistencia a la estructura de contención?
  - En la zona intermedia, para que así se distribuya mejor su acción.
  - En la zona inferior, en la que los empujes unitarios son mayores.
  - En la zona superior, por facilidad constructiva.

2. De los siguientes parámetros, señala el que consideres menos relevante para el cálculo geotécnico de los empujes del terreno.
  - a. cohesión
  - b. límite líquido
  - c. peso específico
  - d. ángulo de rozamiento interno
  - e. posición del nivel piezométrico
3. Una pantalla resiste el empuje del terreno gracias a la gravedad.
  - a. Sí
  - b. No
4. En una pantalla, el terreno siempre tiende a desequilibrarla, y por eso se suelen emplear anclajes.
  - a. Sí
  - b. No
5. Aumentar el empotramiento o el espesor de una pantalla la convierte en una estructura más rígida, y por ello los movimientos que se puedan producir serán menores.
  - a. Sí
  - b. No
6. La existencia de cohesión en un terreno apantallado aumenta la magnitud de los empujes pasivos.
  - a. Sí
  - b. No
7. ¿Cómo se traduce desde el punto de vista de las dimensiones finales de una pantalla, la inclusión de un anclaje?
  - a. Respuesta abierta
8. Una pantalla en voladizo es más estable frente a los empujes del terreno.
  - a. Sí
  - b. No
9. En una pantalla en voladizo, el método de Blum supone que sólo se cumple el equilibrio de momentos.
  - a. Sí
  - b. No
10. Las pantallas en voladizo tienen su punto de giro en su base.
  - a. Sí
  - b. No

### 3.7. Evaluación final

Se proponen dos maneras diferentes para acometer la evaluación final. La primera sería la convencional, a través de un problema a resolver analíticamente en papel. Esta opción sería la opción por defecto para todos los alumnos, pero se les permitirá también evaluarse a través de un ejercicio práctico que ellos mismos diseñen, construyan y comparen con la urna.

## 4. JUSTIFICACIÓN ECONÓMICA

### 4.1. Presupuesto

Este proyecto, para el que se solicitó una ayuda económica de 400 €, ha sido financiado con 320 € por la Universidad de Salamanca, a través de su Programa de Mejora de la Calidad-Plan Estratégico 2013-2018.

### 4.2. Gastos

En la tabla adjunta se muestra un resumen de las compras efectuadas, así como de los proveedores con los que se ha contado.

En total, en este proyecto se han gastado un total de se han gastado un total de 324,55 €.

PROVEEDOR	CONCEPTO	IMPORTE	UNIDADES	TOTAL	FECHA
CETRONIC	Sensor de peso FSR 44 x 44 mm	11,82	4	€47,28	08/05/2017
CETRONIC	Bobina cable flexible 0,5 mm NEGRO 25 m	3,84	1	€3,84	08/05/2017
CETRONIC	Bobina cable flexible 0,5 mm ROJO 25 m	3,84	1	€3,84	08/05/2017
CETRONIC	CC1500 Cable de conexión flexible 1 x 0,50 mm	0,23	3	€0,69	08/05/2017
CETRONIC	Sensor de fuerza resistivo FSR ARDUINO	8,78	2	€17,56	08/05/2017
CETRONIC	10.849/A Puente de conexión (JUMPERS)	0,04	20	€0,80	08/05/2017
CETRONIC	Sensor de peso FSR ARDUINO	11,82	1	€11,82	08/05/2017
CETRONIC	Sensor de fuerza resistivo FSR ARDUINO	8,78	8	€70,24	08/05/2017
CETRONIC	PORTES	6,20	1	€6,20	08/05/2017
FACTURA		Base imponible	TIPO	TOTAL	08/05/2017
		€162,27	0,21	€196,35	



PROVEEDOR	CONCEPTO	IMPORTE	UNIDADES	TOTAL	FECHA
AKI Bricolaje, y jardinería decoración	Poliver Transpar. 100x100cm x5 mm	47,89	1	€47,89	31/05/2017
AKI Bricolaje, y jardinería decoración	Poliver Transpar. 50x100cm x5 mm	24,34	1	€24,34	31/05/2017
FACTURA		Base imponible	TIPO	TOTAL	01/01/1904
		€72,23	0,21	€87,40	
PROVEEDOR	CONCEPTO	IMPORTE	UNIDADES	TOTAL	FECHA
AKI Bricolaje, y jardinería decoración	Escuadra Fortex 200x300 GRIS	4,12	2	€8,24	01/06/2017
AKI Bricolaje, y jardinería decoración	Listón CEP.PIN S/NUD 2.40x9x9 mm	2,19	4	€8,76	01/06/2017
AKI Bricolaje, y jardinería decoración	ARENA SÍLEX 25 kg	6,57	5	€32,85	01/06/2017
FACTURA		Base imponible	TIPO	TOTAL	01/01/1904
		€49,85	0,21	€60,32	
PROVEEDOR	CONCEPTO	IMPORTE	UNIDADES	TOTAL	FECHA
AKI Bricolaje, y jardinería decoración	ARENA SÍLEX 25 kg	-6,57	5	-32,85	01/06/2017
FACTURA		Base imponible	TIPO	TOTAL	01/06/2017
		€(32,85)	0,21	€(39,75)	
PROVEEDOR	CONCEPTO	IMPORTE	UNIDADES	TOTAL	FECHA
AKI Bricolaje, y jardinería decoración	2 Cinchas C/HEB POLIE 25 mmx2,5m	10,12	1	€10,12	01/06/2017
FACTURA		Base imponible	TIPO	TOTAL	01/06/2017
		€10,12	0,21	€12,25	
LIDL	Escuadras en esquina	6,60	1	€6,60	26/05/2017
FACTURA		Base imponible	TIPO	TOTAL	
		€6,60	21%	€7,99	

#### 4.3. Balance final

El trabajo que aquí se presenta ha sido financiado con 320 € por la Universidad de Salamanca, a través de su Programa de Mejora de la Calidad-Plan Estratégico 2013-2018. Inicialmente se había presupuestado 400, mientras que el coste final ha sido de 324,55 €, lo que supone una mínima desviación del 1,4 %.

## 5. CONCLUSIONES FINALES

El objetivo principal establecido como indicador de éxito para este proyecto- la creación de un workshop en relación con los empujes del terreno- ha sido alcanzado, tal y como ha quedado expuesto en esta memoria. El desarrollo de todo el trabajo ha permitido sacar una serie de conclusiones que a continuación se pasan a exponer.

Primeramente, este proyecto presentado ha permitido diseñar y construir una urna con la que construir modelos analógicos de obras geotécnicas, modelos que sirven para que el alumno trabaje contenidos relacionados con los empujes del terreno. Pero, además, el enfoque multidisciplinar manifestado con la inclusión de la electrónica a través de la instrumentación del modelo -sensores de fuerza- se ha manifestado como una herramienta muy interesante para recalcar la importancia de las asignaturas básicas y su conexión con otras materias más específicas de un grado como el de Ingeniería Civil. Este enfoque ha resultado especialmente atractivo ya para los propios docentes, ya que ha permitido una transferencia de conocimiento continua entre los dos campos involucrados.

Desde el punto de vista del terreno, trabajar con material natural ha permitido acercar el modelo más a la realidad. Existen otras opciones que ofrecen como ventaja la manejabilidad del modelo (arroz, serrín, ...), pero por el contrario generan solicitudes muy difícilmente detectables para los sensores existente en el mercado.

La electrónica, ayudada por la plataforma ARDUINO, se ha mostrado como una herramienta para complementar este tipo de modelos y por ende, este tipo de actividades basadas en la recreación de situaciones reales con la ayuda de modelos analógicos. No obstante, los sensores de fuerza disponibles en el mercado a un precio razonable para los presupuestos manejados en este tipo de actividades no han mostrado la repetitividad deseada en sus medidas. Dejando al margen la necesidad de calibraciones prácticamente continuas, su empleo en el modelo de los empujes sobre muros ha resultado coherente, aunque carecen de sensibilidad suficiente para detectar fuerzas de pequeñas magnitudes en zonas superficiales. Peores han sido los resultados al trabajar con el modelo de pantallas, en donde además de no asemejarse numéricamente a lo esperado, han diferido en el modo de funcionamiento detectado (donde se esperan fuerzas mayores, éstas resultan menores, y viceversa). A falta de una solución para este problema, la viabilidad de su aplicación ha quedado parcialmente en entredicho.

Si bien estas son las consideraciones más relevantes, hay que poner en valor que, derivado del trabajo desarrollado, se han puesto a disposición de los docentes nuevas hojas de cálculo con las que diseñar rápidamente problemas de empujes del terreno, y nuevos códigos para Arduino. Por otro lado, la urna, construcción sobre la que pivota todo el trabajo, es adecuada para reproducir otro tipo de situaciones relacionadas con la interacción entre geología y terreno, como puede ser la estabilidad de taludes.

Es parte de la filosofía del equipo de trabajo divulgar al máximo este tipo de metodologías, con el fin no sólo de alcanzar visibilidad, sino también de llegar a otros docentes interesados en este tipo de enfoques y que puedan aportar mejoras a la tarea realizada. Por todo ello, se han creados varios videos que explican el desarrollo del proyecto, y que se han subido a la plataforma Youtube (<https://www.youtube.com/watch?v=C32uF0Kh2Vw>).

El trabajo que aquí se presenta ha sido financiado con 320 € por la Universidad de Salamanca, a través de su Programa de Mejora de la Calidad-Plan Estratégico 2013-2018. Inicialmente se había presupuestado 400, mientras que el coste final ha sido de 324,55 €, lo que supone una mínima desviación del 1,4 %.